



TITLE:

38. PROTOCELL MODEL

AUTHOR(S):

樽見, 和明; Schwegler, Helmut

CITATION:

樽見, 和明 ...[et al]. 38. PROTOCELL MODEL. 物性研究 1987, 49(1): 122-127

ISSUE DATE:

1987-10-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/92828>

RIGHT:

38. PROTOCELL MODEL

群馬大・教養部物理 樽 見 和 明

Univ. of Bremen Helmut Schwegler

1. 序

生命（以後 living systems）と、その他の系（以後 nonliving systems）を区別することは直感的には容易ですが、正確なかつ普遍的な生命の定義を与えることは簡単ではありません。Kaplan¹⁾は、self-maintenance を living-systems を特徴づける重要な要素のひとつとしてあげています。この場合 self-maintenance とは、living systems が外界と比較してより複雑で高秩序に組織化された構造を、破壊的かつ散逸的な外界からのゆらぎの中で保つことを意味しています。Turing の先駆的な仕事²⁾以来 Prigogine 学派に代表される多くの仕事があり、^{3)~4)} 非平衡開放系としての system を考えれば、living systems の持つ self-maintenance という特徴を熱力学の諸法則に矛盾することなく説明できることは、よく知られています。Meinhardt⁵⁾ は更にその延長として、morphogene の化学反応系の model を生物の形態形成に応用しています。

しかしながら、従来の仕事には外から与えられた固定された境界を必要とする、という欠陥があります。化学反応の場合試験管の壁が、この境界に相当します。本来 living systems は、この様なそとから作為的に与えられる固定された境界は必要とせず、むしろ living systems とその外界との境界（living systems 自身の形、大きさを与えるもの）は、系自身が作りだし調節しているものであるはずです。系自身が作り出し、調節している境界のことを self-determined boundary と呼ぶことにしました。⁶⁾

私達の目的は、living systems の持つ self-maintenance, metabolism, そして self-determined boundary の特徴を備えた model を考え、その物理的な mechanism の理解を深めることにあります。^{7), 8)}

私達の提案する model は、実際の living systems に比較すれば簡単過ぎるもので、現代の高度に進化した生物の形態形成等を論じることはできませんが、むしろ私達の model は生命の起源としてよく知られている coacervate (Oparin⁹⁾) や, microsphere (Fox¹⁰⁾) らに近いものでしょう。protocell と私達の model を名づけたゆえんはここにあります。

2. Model

Figure 1に model の概略が示されています。二つの拡散する物質 C と σ を考えます。 C は protocell の中を自由に拡散しある一定の濃度 C_1 を越すと, polymerization もしくは aggregation を起こして porous な medium な C^* という相に変化し, この相が protocell を構成するとします。また単位時間あたり rC の decay を考えます。protocell は液体状の環境に浸っていて, この環境が cell に nutrient σ を境界で一定の濃度 τ で提供するとします。 σ は C と同様に cell の中を自由に拡散し C^* に

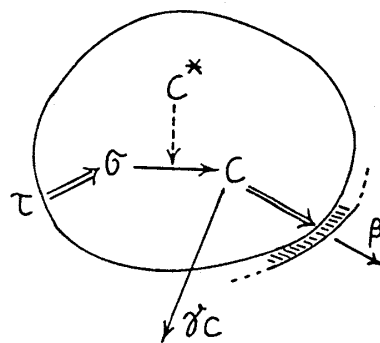


Figure 1: Protocell model
の概略図

よる catalytic な反応によって C に変換されるとします。この化学反応は Michaelis-Menten kinetics の一次近似として, σ の一次の order で起きるとします。

さて cell の中では, C の濃度は C_1 より高いのにもかかわらず, C^* への aggregation は起こりません。なぜなら cell の中では, すべての site はすでに C^* で占められていて aggregation が起きる余裕がないからです。 C は cell の中を境界に向かって拡散し, 丁度 $C = C_1$ となる境界で aggregation を起こすことになります。

境界の運動則を考えてみましょう。境界から外界に向かっての一定の rate β での C の disintegration を仮定しますと, C の material balance により, cell の内側から境界へ運ばれた flux, $-\text{grad } C$ と, 外への disintegration- β の差で境界の成長速度 V_n が, 決まることになります。以上まとめますと系を支配する方程式は,

$$\left. \begin{aligned} 0 &\simeq \frac{D_C}{D_\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \Delta \sigma - \sigma & (1) \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \Delta C - rC + \sigma & (2) \end{aligned} \right\} \quad \text{in cell}$$

$$\left. \begin{aligned} V_n &= -\frac{\partial C}{\partial n} - \beta & (3) \\ C &= C_1, \quad \sigma = \tau & (4) \end{aligned} \right\} \quad \text{on boundary}$$

なお議論に無用な常数は, scaling out されています。scaling の詳細は文献 7) を参照下さい。また, equation 1 において拡散常数 D_σ が D_C よりはるかに大きいとして adiabatic assumption を使用しました。

この方程式系は、最近話題となっている結晶成長のそれに似ています。¹¹⁾ 私達は living systems としての重要な self-maintenance, metabolism, そして self-determined boundary という要素を備えた model を考えることにより、結果的に moving boundary problem に到達した訳です。私達の系と結晶成長のその違いは、protocell には外界から nutrient を取り込んで、catalytic な化学反応で、構成物質である C を作り出すという metabolism の要素が入っていることです。ここに nonliving systems である結晶との違いがあります。

境界の運動 (形態の成長の dynamics) は、equation 3 によりきまります。その運動の結果、拡散場に新たな boundary condition が与えられ、それによって新たに決まった拡散場の解の $-\text{grad } C$ によって、更に新たな境界の運動が決まることになります。つまり cell は自分自身でその境界の運動 (形態の成長) を調整しており、この mechanism が self-determined boundary に他なりません。

3. 定常状態及びその近傍の dynamics

方程式系(1)–(4)の定常解として $r = R_0$ という球対称な解が存在し、Figure 2 に示される様に nutrient supply τ により三つの branch があります。一つは trivial な解 $R_0 = 0$, あとは R_0^+ (solid line) と R_0^- (dotted line) です。

これらの解の安定性を調べるために、次のような線形化を行います。

$$r = R_0 + \varepsilon Y_l^m(\theta, \varphi) e^{\lambda t} \quad (5)$$

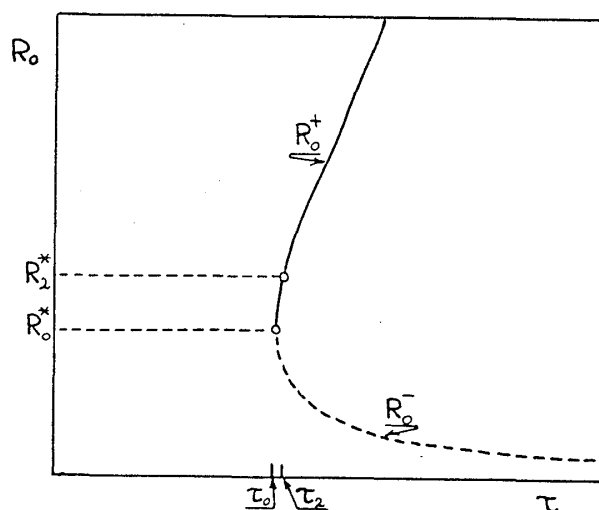
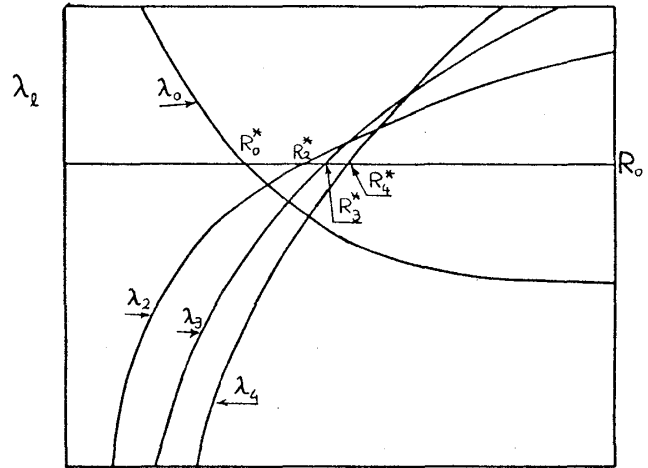


Figure 2: Bifurcation diagram R_0 vs τ

更にここでは equation 2 において、 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ とおきます。これは境界の運動の時間 scale に比べて、C の拡散項の時間 scale が早く、遅い時間 scale の境界の運動からみれば、拡散場が quasi-steady state に到達していると、見なすことを意味しています。(この仮定なしでも議論を進めることはできます。⁸⁾ しかし結果の本質に変わりはありません。)

eigenvalue λ は m には依存せず、 l のみに依存することが分かりました。 λ_l の各々の $l = 0, 1, 2, 3, 4$ についての R_0 の依存性を Figure 3 に示しました。 $\lambda_{l=0}$ (spherical mode) の結果

から, R_0^- の branch は不安定, R_0^+ の branch は安定ということがわかります。 $\lambda_{l=1}$ は常にゼロ, でこれは translation に対応する mode が marginal に安定ということで, それ以上の物理的な意味はありません。 λ_l ; $l \geq 2$ mode については, critical な半径 R_l^* が常に存在し $R_0 < R_l^*$ では安定 $R_0 > R_l^*$ では不安定です。以上 nutrient supply τ に関してまとめますと,

Figure 3: Eigenvalue λ_l vs 半径 R_0

$0 < \tau < \tau_0$: protocell は十分な nutrient がない為に, $R_0 = 0$ の trivial な steady state に到達する。死滅する。

$\tau_0 < \tau < \tau_2$: この中間領域でのみすべての mode が安定で cell は τ に対応する半径 R_0 で安定に存在する。これは self-maintenance を意味します。

$\tau > \tau_2$: 少なくともまず, $l = 2$ の mode が不安定になり分割の dynamics が initiate される。

4. 定常状態からはるかに離れた状態での dynamics

前章での議論では, 定常状態の近傍の dynamics のみ取扱可能で, たとえば $\tau > \tau_2$ の領域において, $l = 2$ によって initiate された分割の mode が非線形領域でどのような振舞いをするか, と

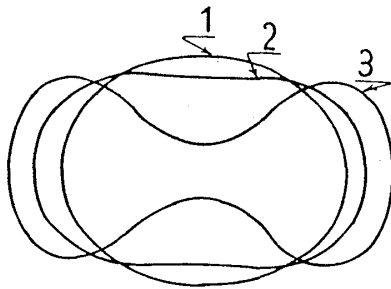


Figure 4: 非線形領域での dynamics。1, 2, 3 は分割へ至る途中の時間経過を表す。

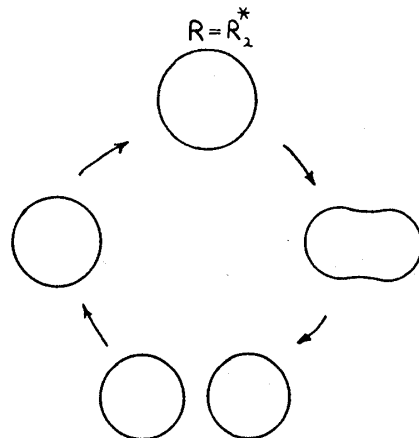


Figure 5: Proliferation cycle

いう興味ある問いに答えることはできません。そこで私達は、Langer らによって結晶成長の非線形領域の dynamics を取り扱うのに提案された¹²⁾ boundary layer の手法をこの protocell の場合に適用することを考えました。この手法の本質は、時間的にも空間的にも nonlocal な複雑な dynamics を、境界近辺の薄い boundary layer に還元して考え、最終的に境界の成長速度を、local な量 (curvature, arclength) で表そうというものです。(詳細は文献 13) を参照して下さい。)

Figure 4 にその結果のみを示しました。これにより、 $l = 2$ の initiate された mode が非線形領域で増幅され分割へと進むことが分かります。とすれば、Figure 5 にある様な proliferation の cycle が起きることが考えられます。

5. 最後に

進化の最も初期のころに、私達が提案した model に似たものが重要な役割を果たしたことは、十分に考えられます。複雑な生化学の進化の step はそれに必要な化学物質が local なところに集まっていたはじめて可能です。とすれば私達が提案した model の様な protocell が metabolic な化学反応を支える compartment として外界からの攪乱から守り、それと同時にその化学反応によって cell 自身が生産されたと考えられないでしょうか。

Reference

1. Kaplan, R. W.: Der Ursprung des Lebens. Thieme Verlag, Stuttgart (1978).
2. Turing, A. M.: The chemical basis of morphogenesis. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B237 (1952) 37–72.
3. Nicolis, G. & Prigogine, I.: *Self-organization in nonequilibrium system*. Wiley Interscience. New York, London, Sydney, Toronto (1977).
4. Haken, H.: *Synergetics*. Springer. Berlin-Heidelberg-New York (1977).
5. Meinhardt, H.: *Models of biological pattern formation*. Academic Press. London-New York (1982).
6. An der Heiden, U., Roth, G. & Schwegler, H.: Principles of self-generation and self-maintenance. Acta Biotheoretica 34 (1985) 125–138.
7. Schwegler, H., Tarumi, K. & Gerstmann, B.: Physico-chemical model of a protocell. J. Math. Biol. 22 (1985) 335–348.
8. Schwegler, H. & Tarumi, K.: The Protocell: A mathematical model of self-maintenance. Biosystems 19 (1986) 307–315.

9. Oparin, A. J.: *Genesis and evolutionary development of life*. Academic Press. New York (1968).
10. Fox, S. W.: A theory of macromolecular and cellular origins. *Nature* **205** (1965) 328–340.
11. Langer, J. S.: Dynamics of dendritic pattern formation. *Mat. Sci. Eng.* **65** (1984) 37–44.
12. Ben-Jacob, E., Goldenfeld, N., Langer, J. S. & Schön, G., Boundary-layer model of pattern formation in solidification. *Phys. Rev.* **A29** (1984) 330–340.
13. Tarumi, K. & Schwegler, H.: A nonlinear treatment of the protocell model by a boundary layer approximation. to appear in *Bull. Math. Biol.*

39. Spatiotemporal Chaosの特徴づけに向けて

東大教養・物理 金子 邦彦

§ 1. 序

自然現象, 人工現象を問わず, “複雑さ” という言葉で特徴づけられるものは枚挙にいとまがない。にもかかわらず, そのうちの多くのものは「汚ないデータ」として自然科学の対象外とされてきた。ある意味で, 近年の chaos の研究は, そのような「複雑さ」への解析への第一歩といえる。しかし, 低自由度起源の chaos で説明される複雑さが万能ではむろんなく, 自由度の大きい系ではそれに固有な, 複雑さの起源があると思われる。ここでは, そのような複雑さを示す簡単なモデルを呈示し, それを定性・定量的に調べあげ, 「Spatiotemporal Chaos の統計力学」をつくることを目指す。

応用としては, 流体のみならず, プラズマ, 化学反応系, 固体物理, 光学等の広い分野で見られる乱流現象やパターン形成に関連する諸問題を主に念頭に置いているが, 将来の展望としては, 神経系に代表される生命現象でのネットワークのもつ複雑さやコンピュータ設計^{*)}等にも関係してくることを夢見ている。

§ 2. モデル

*) 大塚・池田による光非線形素子の結合系のダイナミクスは, この方向でも非常に興味深い。